

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладобудування

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології
та системи точної механіки»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «комп'ютерно-інтегрована ваговимірювальна система готової
металургійної продукції»**

Виконав :

студент IV курсу, групи ПМ-61

Бойко Максим Володимирович _____

Керівник:

старший викладач

Зайцев Віктор Миколайович _____

Консультант з технологічного розділу:

д.т.н., професор

Антонюк Віктор Степанович _____

Рецензент:

к.т.н. , доцент

Шевченко Вадим Володимирович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

				ДП ПМ61 00.001.00		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Бойко М.В.				1	1
Керівн.	Зайцев В.М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПБ Гр. ПМ-61	
Консульт.	Антонюк В.С.					
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «комп'ютерно-інтегрована ваговимірювальна
система готової металургійної продукції»**

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Бойко Максима Володимировича

1. Тема проєкту «комп'ютерно-інтегрована ваговимірювальна система готової металургійної продукції», керівник проєкту Зайцев Віктор Миколайович, старший викладач б/с, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2020 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту 3.1. Границі вимірювальних зусиль, m – НГВ-80,0; НмГВ -5,0; 3.2. Тип вимірювальної системи – електромеханічна на базі тензOMETричних перетворювачів; 3.3. Кількість датчиків вимірювального пристрою -4; 3.4. Границя відносних приведених похибок $\pm 0,1\%$; 3.5. Тип пружного елемента – PIN; 3.6. Робочий коефіцієнт перетворення 2,0 мВ/В.

4. Зміст пояснювальної записки 4.1. Огляд та аналіз існуючих конструкцій вимірювання зусиль; 4.2. Розробка конструкції та принципових схем ваг. 4.3. Розробка принципових схем тензорезисторного перетворювача; 4.5. Розрахунок метрологічних характеристик тензорезисторного датчика сили; 4.6. Технологічна частина проєкту

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1 Складальний кресленик ваг-1; арк. Ф А1. 5.2.Лист складальних одиниць – 1арк. ф А1; 5.3.Лист робочих креслеників деталей- 1 арк.ф А1; 5.4. Лист схем та графічних залежностей -1 арк.ф А1;

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк Віктор Степанович, д.т.н., професор		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Одержати у керівника дипломного проекту (ДП) затвердженого завідувачем кафедри завдання на ДП	30 квітня 2020 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки ДП	05 червня 2020 р.	
3.	Виконання технологічного розділу ДП, передача на перевірку та одержання підпису консультанта	05 червня 2020 р.	
4.	Виконання графічних матеріалів ДП	05 червня 2020 р.	
5.	Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгука на ДП	08 червня 2020 р.	
6.	Одержання рецензії на ДП	09 червня 2020 р.	
7.	Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	09 червня 2020 р.	
8.	Подання ДП, відгука та рецензії в екзаменаційну комісію університету	15 червня 2020 р.	
9.	Захист дипломного проекту в екзаменаційній комісії університету	18 червня 2020 р.	

Студент _____

Максим БОЙКО

Керівник _____

Віктор ЗАЙЦЕВ

Анотація

Дипломний проект бакалавра на тему «Комп'ютерно-інтегрована ваговимірювальна система готової металургійної продукції». Проект складається із вступу, двох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Проект містить 54 сторінок, 9 таблиць, 25 рисунка, список використаних джерел з 12 найменувань, 4 додатків.

Метою дипломного проекту є розробка тензометричного перетворювача сили. У проектно-конструкторському розділі проведено огляд та аналіз існуючих тензометричних перетворювачів, проаналізовано властивості вимірювального середовища, розроблено принципові схеми, розраховано метрологічні характеристики та розроблено конструкцію ваговимірювального тензометричного перетворювача.

В технологічному розділі проведено розрахунки на технологічність, розроблено структуру та технологічну схему складу.

Ключові слова: тензометричний перетворювач сили, тензорезистор, деформація.

Summary

Bachelor's thesis project on "Computer-integrated weighing system of finished metallurgical products". The project consists of an introduction, two sections, conclusions, bibliography and appendices. The project contains 54 pages, 9 tables, 25 figures, a list of sources used with 12 items, 4 appendices.

The aim of the diploma project is to develop a strain gauge. In the design section the review and analysis of the existing strain gauges are carried out, the properties of the measuring medium are analyzed, the basic schemes are developed, the metrological characteristics are calculated and the design of the weight measuring strain gauge is developed.

In the technological section calculations on manufacturability are carried out, the structure and the technological scheme of a warehouse are developed.

Keywords: strain gauge, power strain gage, strain gauge.

Зміст

1.	Проектно-конструкторський розділ.....	8
1.1	Розробка технічних умов на перетворювач сили.....	8
1.2	Принцип роботи РІН-датчика.....	9
1.3	Огляд сучасних закордонних аналогів та прямого конкурента.....	11
1.4	Розробка структурної схеми тензометричного перетворювача.....	19
1.5	Тензорезистори, їх властивості, вимірювальні ланцюги та метрологічні характеристики....	19
1.6	Конструкції й технічні характеристики	20
1.7	Основні техніко-метрологічні характеристики часто використовуємих тензорезисторів.....	23
1.8	Розробка принципової схеми підключення тензорезисторів.....	27
1.9	Розрахунок певних елементів тензометричного перетворювача.....	29
1.10	Підбір тензорезисторів для тензометричного перетворювача.....	29
1.11	Розрахунок статичної характеристики тензометричного перетворювача.....	31
1.12	Розрахунок динамічної характеристики тензометричного перетворювача.....	32
1.13	Розрахунок пружного елемента тензометричного перетворювача.....	36
1.14	Розрахунок метрологічних характеристик тензометричного перетворювача.....	39
1.15	Моделювання ріп-датчика в програмному пакеті Solid Works.....	41
2.	ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	42
2.1	Схеми збіркового складання.....	43
2.2	Технологічна схема складання.....	44
2.3.1	Розрахунок прямої задачі.....	45
2.3.2	Розрахунок Оберненої задачі.....	47
2.4	Проектування технологічного процесу.....	49
2.5	Визначення технологічності.....	50
	Висновки.....	53
	Список використаних джерел.....	54

					<i>ДП ПМ6101.000.000 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Комп'ютерно інтегрована ваговимірювальна система готової металургійної продукції</i>		
<i>Разраб</i>		<i>Бойко М.В.</i>					
<i>Пров</i>		<i>Зайцев В.М.</i>					
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утв</i>							
					<i>Литера</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
						6	54
					<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ПБФ, ПМ-61</i>		

1. ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ
РОЗДІЛ

					ДПБ ПМ6101.000.000 ПЗ	Лист
						7
Зм...	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

1. Проектно-конструкторський розділ

1.1 Розробка технічних умов на перетворювач сили

Проектований тензорезисторний перетворювач сили повинен відповідати наступним технічним умовам, які вказані в табл.1.

Табл.1.

Тип перетворювача	Вісьовий (pin)
Номінальне навантаження, т	20
Робочий коефіцієнт передачі, мВ/В	2
Допуск РКП, мВ/В	0,1
Вхідний опір, Ом	380
Вихідний опір, Ом	
Максимальна напруга живлення, В	
Номінальний температурний діапазон, °С	Від 0 до 100
Температурний коефіцієнт нульової точки	0,02/10°С
Температурний коефіцієнт чутливості	0,02/10°С
Нелінійність, %	0,05
Гістерезис, %	0,05
Стабільність показів, %	0,03
Сумарна похибка	0,1
Діаметр вузлів вмонтування, мм	64
Глибина отвору вузла вмонтування, мм	300

Надалі необхідно проектування тензорезисторний датчик сили, з даними параметрами, який буде вмонтовано в комп'ютерно інтегровану ваговимірювальну систему готової металургійної продукції .

Конструкцію аналогу розглянемо на прикладі машини фірми «Портал»

Даний тензодатчик вимірює по принципу міцно фіксованої балки подвійного вигину. Дві поверхні на кінцях датчика затиснені, а до основної циліндричної частини прикладається навантажувальне зусилля тілом, які і приводять до деформації чутливого елементу датчика.

До осі прикладається навантаження, значення якої залежить від маси тіла. При певній установці тензодатчика-вісі прикладене навантаження правильно розподіляється на опорні поверхні. Великі напруження, які виникають в зоні між отворами, вимірюються тензорезисторами.

Принцип роботи: вимірювання навантаження ріп-датчика приймає зусилля, що вимірюється шляхом конвертації деформації за допомогою тензорезисторів, які знаходяться в канавках зовнішньої окружності. Визначається площа зсуву.

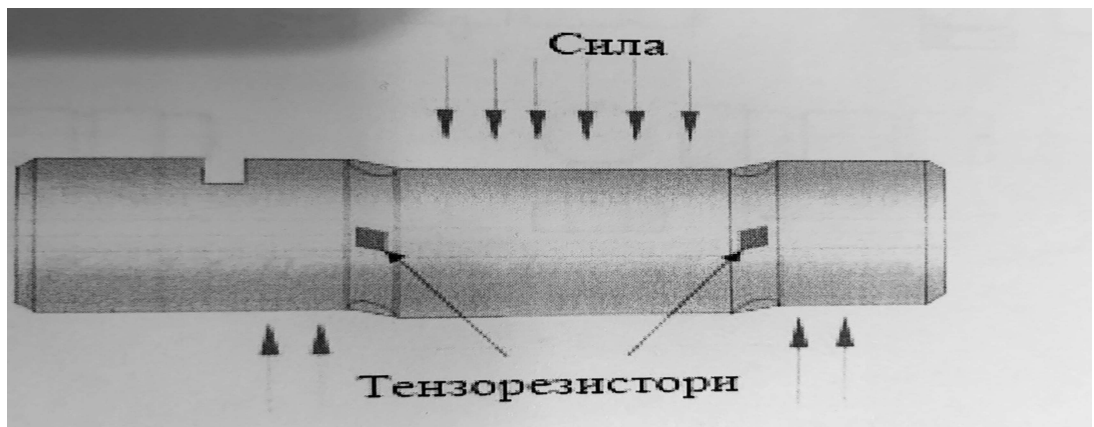


Рис 1.2 Принцип ріп-датчика

На рис 1.3 показано приклади як можна конструктивно вбудувати ріп-датчик для вимірювання зусилля.

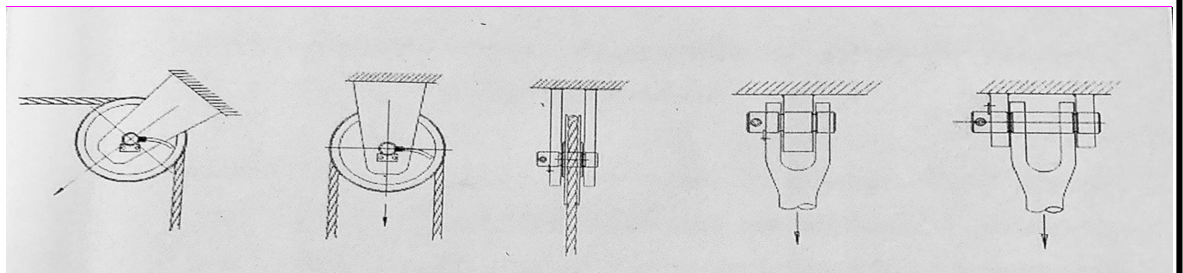


Рис.1.3 Приклади локації датчика

Для вимірювання зусилля ріп-датчика повинен бути надійно прикріплений в потрібному положенні для того, щоб визначити її орієнтацію щодо пов'язаної з неї зборки. Все обладнання повинно бути повністю зафіксовано в режимі обертання включно, для того щоб гарантовано отримати точно відтворювані дані.

Стандартний ріп-датчик навантаження використовується для сприйняття сили тільки в одному напрямку. Зусилля, яке діє під прямим кутом буде показувати нульовий вихідний сигнал від датчика.[8]

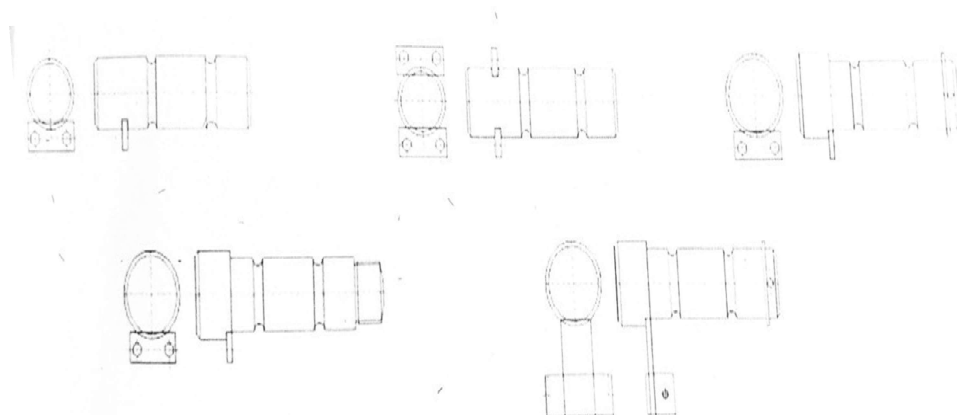


Рис. 1.4 Приклади фіксації датчика

1.3 Огляд сучасних закордонних аналогів та прямого конкурента

Esit Elektronik Ltd. Sti.

PLC

Датчики PLC виконують вимірювання навантажень. Даний датчик конструктивно знаходиться в систему у вигляді осі, до якої приєднується гак підйомного механізму. Корпус виготовлений зі спеціальної сталі і покритий антикорозійним покриттям, має клас захисту IP-68 і повністю вологозахищений. Місце розташування тензорезисторів закрита закріпленою кришкою з нержавіючої сталі. Галуззю застосування є вимір навантажень або запобігання перевантажень в кранових системах підйому вантажів. Переваги: ступінь захисту IP68.

					ДПБ ПМ6101.000.000 ПЗ	Лист
						11
Зм...	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

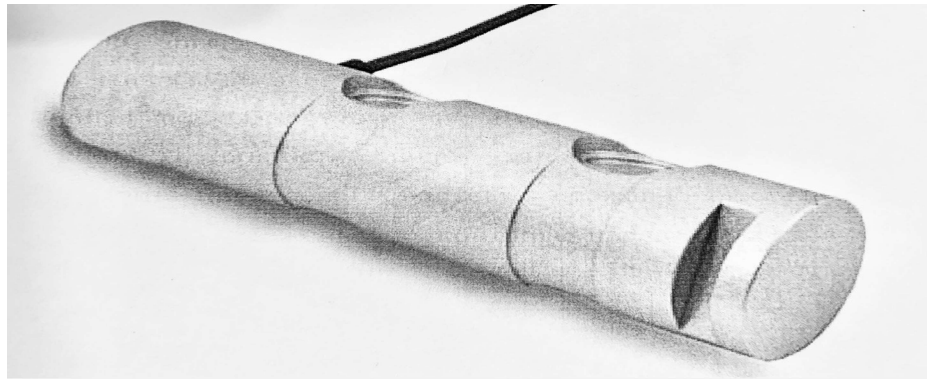
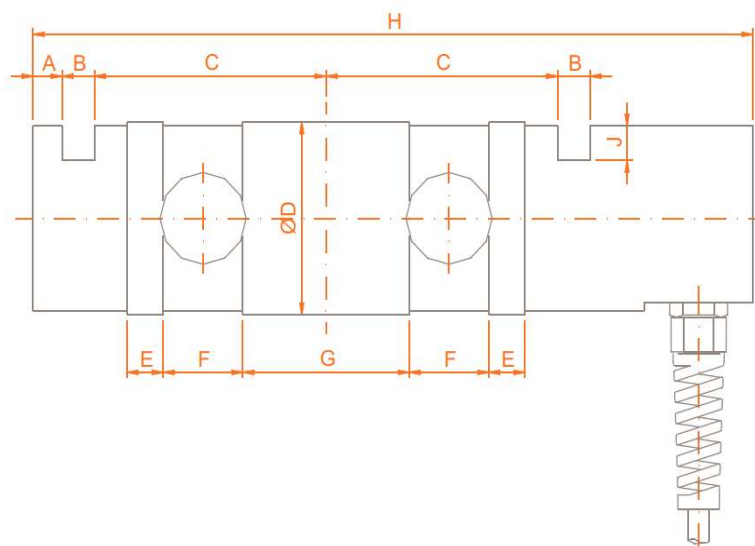


Рис.1.5. Датчик PLC

Технічні характеристики

Табл. 1.2.

Номінальні навантаження (E _{max})	кг	2000 5000 10000 30000
Загальна похибка	%	≤±1.0
Мінімальне навантаження	%E _{max}	150
Максимальне перенавантаження	%E _{max}	300
РКП (C _n)	мВ/В	1
Нульовий баланс	%C _n	≤±5.0
Вхідний опір	Ω	380 ±20
Вихідний опір	Ω	350 ±20
Компенсуючий робочий діапазон	°C	-10...+40
Робочий діапазон температур	°C	-40...+80
Матеріал датчика		Сталь
Клас захисту (по класифікації EN60529)		IP68



НПВ (кг)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	Масса (кг)
2000	8	7	42	40	6	15	32	139	7,5	0,9
5000	8	7	50	40	6	17	32	160	7	1,1
10000	8	9	64	50	10	22	46	199	9	2,5
30000	12	14	102	85	17	37	78	290	13,5	11,7

Рис.1.6 Датчик PLC

«ТОКВЕС»

Тензодатчик АТХ



Рис 1.7. Тензодатчик АТХ

Технічні характеристики

Табл.1.3

Найбільша межа вимірювання, т	1, 2, 3, 5, 7.5, 10, 15, 20	Робочий діапазон температур, °C	-30..+70
Робочий коефіцієнт передачі, мВ/В	1.2±0.02	Гранично допустиме навантаження, %	150
Клас точності, %	0.5	Вирішальне навантаження, %	200
Рекомендована напруга живлення, В	Не більше 12		
Баланс нуля, %	1	Макс напруга живлення, В	15
Температурний дрейф нуля, %	0.05	Клас захисту	Ір67
Температурний дрейф сигналу, %/10°C	0.1	Матеріал	Легована сталь
Вхідний опір, Ом	750±50	Довжина кабеля	6
Вихідний опір, Ом	703±2	Діаметр кабеля	5

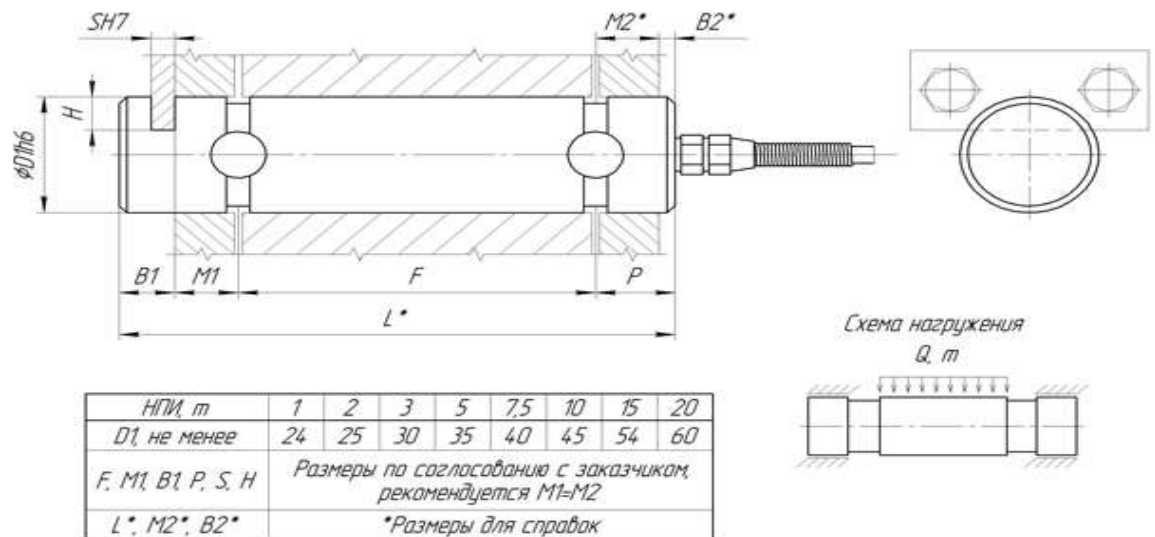


Рис.1.8 Тензодатчик АТХ

Датчик фірми Zemic

Ознайомимся з принципом роботи вісьового датчика фірми Zemic.



Рис.1.9. Вісьовий тензометричний датчик.

Тензодатчик працює за принципом повністю затиснутої балки подвійного вигину. На краях датчика фіксуються дві циліндричні поверхні, а до основної частини прикладається зусилля навантажувального тіла, яке і деформує пружний корпус датчика.

На вісь накладається зусилля, значення якого напряму залежить від маси тіла. При конкретній установці ріп-датчика прикладене навантаження розподіляється по всій поверхні. Великі напруження, виникають на площині між отворами, сприймаються тензорезисторами.[8]

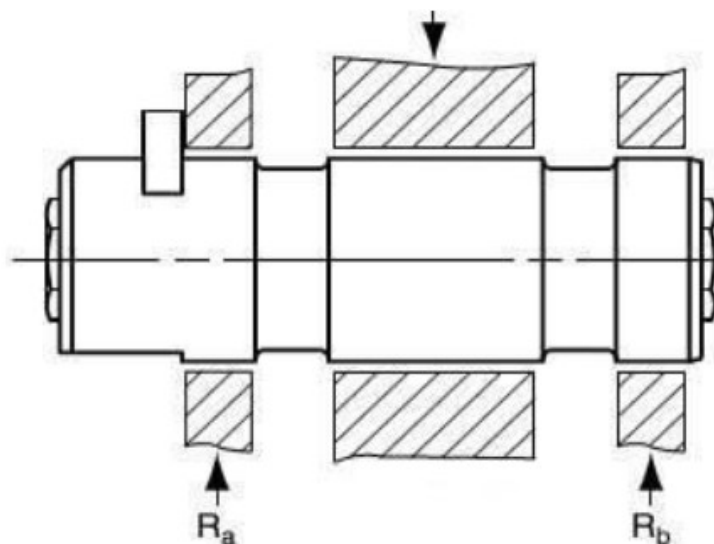


Рис. 1.10. Принцип роботи тензодатчика

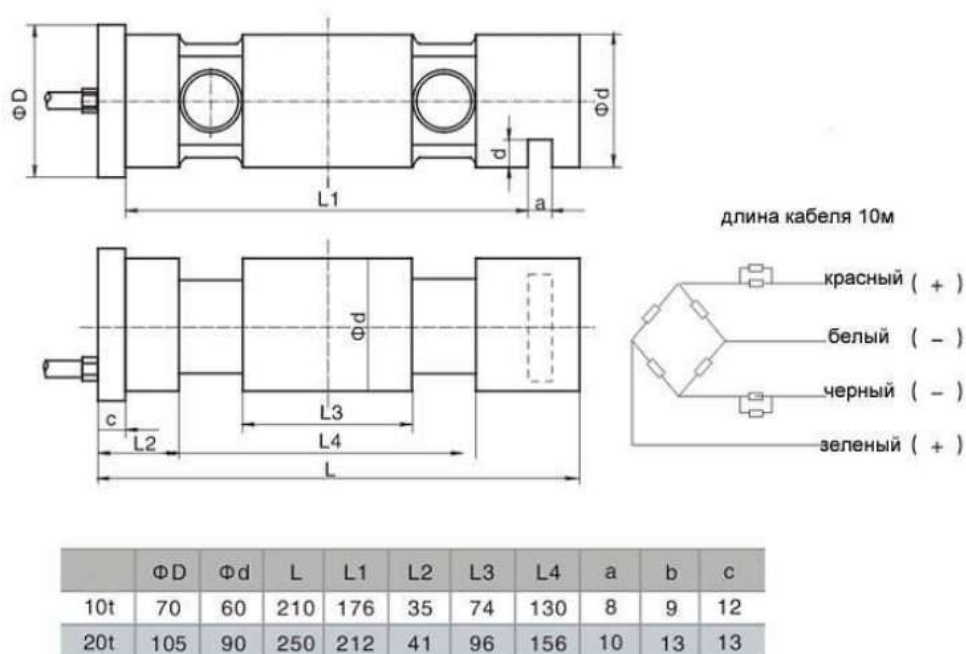


Рис.1.11. Габаритні розміри і під'єднання тензодатчика Н9Х1

Тензодатчик фірми Magtrol

Застосовується в наступних областях:

- Крани та підйомні споруди
- Машинобудівна галузь
- Суда, танкери, нафтодобувні платформи
- Ядерна промисловість
- Авіація
- Хімічна промисловість

Особливості:

- Оцінки від 2,5 до 1250kN
- Ідеально підходить для використання в агресивних середовищах
- Конструкція з нержавіючої сталі

Технічні характеристики

Номінальне навантаження	2.5, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1250
Граничне навантаження	350%, 400%, 500%
Нелінійність	$\leq \pm 1\%$
Напруга збудження	Рекомендовано 10 В, максимум 15 В
Діапазон робочих температур	+20 до +80°C
Компенсуючий температурний діапазон	-10 до +50°C
Клас захисту	IP67

Висновки по огляду аналогів об'єкту проектування

Після огляду було зроблено висновок, що з'являється необхідність у розробці ріп-датчика, адже приведені аналоги мають певні недоліки.

Серед яких

- Обов'язковість виконання відношення між поперечними розмірами які визначаються значенням навантаження та висотою, котра часто у конструктивному відношенні не зручна через вбудований ЧЕ в вимірювальному пристрої;
- Нелінійність перетворення певних характеристик, пов'язаних зі зменшенням плеча сили через великий вигин балки при зусиллі тіла, залежність вихідного сигналу від прикладеної сили, тому що від виміру до виміру точка прикладання сили зміщується;
- Незахищеність консольної балки від зовнішніх механічних впливів, та крутних моментів;
- Велика чутливість до поперечних навантажень причиною чого необхідно застосування заходів захисту.

1.4 Розробка структурної схеми тензометричного перетворювача

Схема послідовного перетворення вимірювальної величини в тензометричному перетворювачі представлена на рисунку 1.14

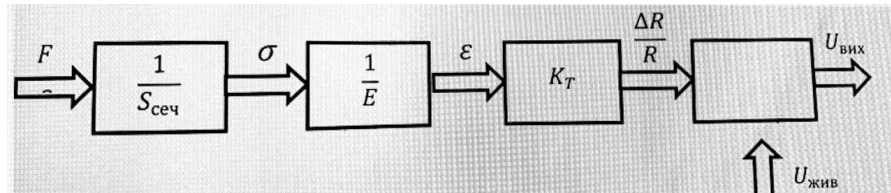


Рис. 1.14- Структурна схема тензометричного перетворювача

Перша і друга ланки схеми - позначають пружний чутливий елемент (ПЧЕ), в нашому випадку тип чутливого елемента осьовий. Перша ланка схеми відповідає за конструкцію (форму) ПЧЕ, вона перетворює силу прикладену до стрижня в поле механічних напруг (σ). Друга ланка схеми відповідає за матеріал з якого виготовлений ПЧЕ, Вона перетворює поле механічних напруг (σ) в поле деформацій (ϵ). Третя ланка схеми-тензорезистори (ТР), яким передається деформація від поверхонь ПЧЕ, розташованих безпосередньо під ними. ТР перетворюють деформацію в зміну опорів ($\Delta R/R$). Остання ланка схеми-позначає електричну (мостову) схему з'єднань ТР, яка перетворює зміну опорів ($\Delta R/R$) тензорезисторів і нормуючих перетворювачів, в зміну вихідної напруги

1.5. Тензорезистори, їх властивості, вимірювальні ланцюги та метрологічні характеристики

Основною ланкою тензорезисторних перетворювачів, які впливають на точність вимірів, чутливий елемент(ЧЕ), який відчуває прикладену силу.

В конструкціях зсувних ЧЕ виконуються за допомогою трьох основними способами задання деформації зсуву:

- Задання поперечної сили на фіксовані балки або до системи розміщених по колу балок, геометрична форма, яких є такою що при зсуві більше за деформацію прогину;
- Скручення чутливого елемента моментом, створюваним прикладним пристроєм;
- Надання на поздовжню деформацію плеча однакової та протилежної за знаком деформації з допомогою деяких механічних конструктивних зв'язків.

1.6. Конструкції й технічні характеристики дискретних металевих і напівпровідникових тензорезисторів

На шматок тонкого паперу або лакову плівку 2 монтується так звана решітка із зигзагоподібно покладеного мідного дроту 3 діаметром 0,03 - 0,04 мм. На кінці дроту приєднуються (пайкою або зварюванням) вихідні мідні провідники 3. Верхній перетворювач обробляється шаром лаку. Такий перетворювач, будучи приклеєним до випробуваної деталі, деформації її поверхневого шару. Вимірювальною базою перетворювача є сприймає довжина деталі, займана дротом. Найбільш постійно використовуються перетворювачі з базами 4-21 мм, що мають опір 31-501 Ом.

Фольгові перетворювачі це стрічка з фольги завтовшки 5-10 мкм, на якій певна частина металу забрана травленням таким чином, що частина, що залишилася, утворить решітку з виводами. Фольгові перетворювачі мають менші габарити, чим провідні; існуючі тензорезистори з базою до 0,7 мм.

Металеві плівкові тензорезистори виробляються за технологією вакуумної сублімації тензочутливого матеріалу з наступним осадженням його на основу (подкладку). Форма тензорезистора задається маскою,

через яку проводиться напилювання. Плівкові тензорезистори мають товщину менше 1 мкм.

Досить важливим параметром тензочутливої решітки є відстань між витками. Параметри відстані при заданих габаритах резистора число витків a , отже, і опір, а також допустимий струм, що обмежується самонагріванням і буде тим менше, чим відстань між самими витками.

Наявність поперечних певних ділянок довжиною b на рис. 1.15, з'являється зміну опору тензорезистора в зв'язку деформації цих ділянок при зусиллі на деталь напруження, перпендикулярного осі чутливості тензорезистора. Для дротових тензорезисторів відношення поперечної й поздовжньої чутливостей визначається відношенням b/L . У фольгових тензорезисторів поперечна чутливість значно менша за рахунок розширення поперечних ділянок (рис. 1.15, б). Характерні типи фольгових перетворювачів показані на рис. 1.15, в, г, д. На рис. 1.15, в зображений елемент, О складається із чотирьох тензорезисторів, що утворюють чотири плечі мосту.

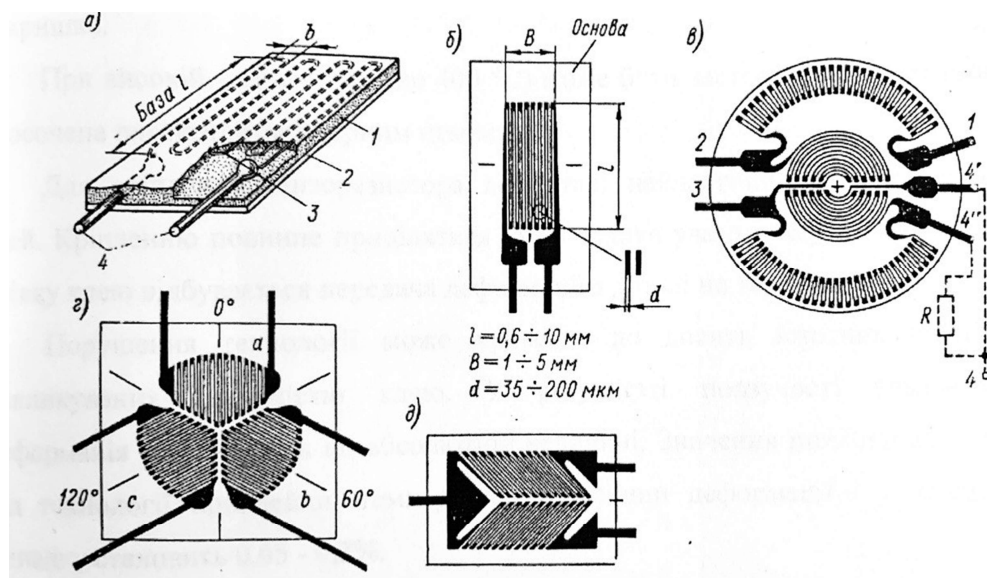


Рис. 1.15. Конструкції тензорезисторів

Цей елемент наклеюється на мембрану. Тензорезистори, розташовані в центрі, піддаються розтягу, на периферії -стиску. До

виходів 1 і 3 з'єднується живлення, виходи 2, 4' та 4" утворюють вимірювальну діагональ в приладі. Виходи 4 і 4" розірвані для того, щоб була можливість ввімкнути резистор К у потрібне плече й домогтися підбором R рівноваги мосту. Розетка 1 з трьох тензорезисторів, показана на рис. 1.15, г, застосовується при вимірі напружень деталі, що перебуває в плосконапруженому стані, у тому випадку, коли напрямки дії напружень невідомі. По змінах опорів трьох тензорезисторів визначаються напрямки головних напружень і їхніх значень. Елемент, показаний на рис. 1.15, д, двох тензорезисторів і складається використовується при вимірі деформації валів при їхньому скручуванні.

Для тензорезисторів, що працюють у діапазоні температур до 180 °С, за основу тензочутливого елемента використовується константан . Для високих температур (220- 1100°С) застосовуються спеціальні сплави.

Основа тензорезистора являє собою тонку смужку просоченого клеєм паперу або лакову плівку, із цього ж матеріалу виконується звичайно й покриття.

При високій температурі (до 400 °С) може бути застосована склотканина, просочена високотемпературним цементом. Для закріплення тензорезистора до самої деталі постійно використовується клей. Місце кріплення повинне постійно перевірятися, тому що саме через плівку виконується передача деформації з деталі на чутливий елементі.

Порушення технології може привести до досить істотних похибок, викликаних повзучістю клею. У результаті повзучості вимірювана деформація зменшується по абсолютній величині. Значення похибки залежить від технології приклеювання, температури, величини деформації і у кращому випадку становить 0,05-0,2%.

З порівняння температурних можливостей тензочутливого матеріалу й клею видно, що обмеження температурного діапазону

зумовлюється насамперед клеями. Тому для кріплення високотемпературних тензорезисторів застосовують неорганічні фосфатні цементи і жаростійкі окисли алюмінію, о наносяться на деталь методом газополуменового напилювання. Саме на такому кріпленні температурний діапазон обмежений не повзучістю кріплення з високими підвищеннями температури, а поганих ізоляційних властивостей цементу або оксиду алюмінію. Робочий діапазон тензорезисторів динамічних деформаціях обмежений температурою 400- 650 °С при певних деформаціях і 650-850 °С при динамічних деформаціях. В випадку виміру динамічних деформацій у діапазоні високих температур до 1100 °С використовується кріплення за допомогою контактного зварювання. [3]

1.7. Основні техніко-метрологічні характеристики часто використовуваних тензорезисторів

До основних техніко-метрологічних характеристик відносять деяку тензочутливість, повзучість матеріалу, гістерезис, температурна нестабільність та динамічні характеристики.

Чутливість тензодатчика визначається тензорезистивними головним властивостями матеріалу чутливого елемента, однак у певній мірі впливає від конструкції самого перетворювача, матеріалу, виду й певних умов полімеризації клею та інших менш важливих факторів.

Тензочутливість тензорезистора та тензорезистивного матеріалу, вимірюється за допомогою коефіцієнта відносної тензочутливості:

$$K = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \quad (1.1)$$

Повзучість проявляється при зміні вихідного сигналу при заданому і постійному значенні деформації й знаходиться як:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Delta \varepsilon_l}{\varepsilon_l} \quad (1.2)$$

Де $\Delta \varepsilon_l$ — під'єднана до входу зміна вихідного сигналу при параметрично заданій відносній деформації ε_l . Признаком повзучості є пружна нестійкість основи і клею. У межах певного діапазону деформацій повзучість основна частина тензорезисторів не перевищує 0,1...1,1% на 1 годину після приклеювання й відповідно 1,1...1,6% на шосту годину.

Механічний гістерезис, і повзучість, виникає певною пружною недосконалістю основи і клею й параметрично визначається як під'єднана до входу різниця потенціалів вихідного опору для певного значення деформації за умови, що ці покази деформації виконуються при плавному її зростанні й плавному зменшенні. Для певних видів тензорезисторів механічний гістерезис лежить у межах 0,6...5,2%.

Температурна нестабільність, або зміна температури навколишнього середовища на основні значення тензорезисторів, виникає, у зміні опору тензорезистора або у появі зайвих механічних напружень внаслідок розходження в температурних коефіцієнтах прямолінійного розширення сплаву із якого виконаний тензорезистор й досліджувана деталь.

Якщо В й В, певні температурні коефіцієнти прямолінійного розширення розробляючої деталі й підкладки тензорезистора, то відносна деформація тензорезистора, в зв'язку з зміною навколишньої температури на $\Delta\theta$.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = (\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (1.3)$$

а зміна його опору при цьому

$$\Delta R = kR \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (1.4)$$

Так як зміна опору тензорезистора дорівнює $\Delta R_{\alpha} = R\alpha_{\theta}$, то загальна зміна викликане зміною температури навколишнього опору тензорезистора, середовища на $\Delta\theta$,

$$\Delta R_{\theta} = R\alpha_{\theta} + kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta = R[\alpha + k(\beta_d - \beta_{\Pi})]\Delta\theta \quad (1.5)$$

Основною динамічною характеристикою тензорезисторів є їхня частота, певні значення якої для наклеюваних тензорезисторів знаходяться у межах 110...310кГц

Власна частота тензорезистора впливає на граничну частоту досліджуваного процесу, на якій частотними відносними похибками можна знехтувати. Для знаходження змінних деформацій зазвичай обирають тензорезистивний перетворювач, власна частота якого в 7...11 разів обходила частоту деформації.

Важливим параметром тензорезисторів є допустима потужність K , що може зникати в тензорезисторі за певних умов, що його збільшення температури не перевищить припустимого значення. Гранична потужність тензорезистора перебуває в залежності від його власних геометричних розмірів, що може застосовуватись як при визначенні K для існуючих тензорезисторів, так і при визначенні геометричних розмірів розробляємих перетворювачів, виходячи із заданої допустимої потужності або допустимих параметрів вимірювального І:

$$\Delta\theta = PR_T = \frac{P}{S_0\alpha_t} = \frac{P_{уд}}{\alpha_T} \quad (1.6)$$

де R_T тепловий опір; S_0 площа поверхні тепловіддачі матеріалу резистора; α_t коефіцієнт теплопередачі; $P_{уде} = P/S_0$, питоме теплове навантаження.

Розсіювання теплоти від тензорезистора до досліджуваної деталі через тонкий шар клею і підкладку набагато перевищує теплопередачу в навколишнє середовище. Тому можна гадати, що практично все існуюче тепло відводиться в досліджувану деталь, а за основну площу приймають для плівкових і фольгових тензорезисторів поверхню половину резистора, повернену до досліджуваної деталі, а для дротових поверхней дроту чутливого елемента.

Основна потужність використовуваних у цей час провідних, фольгових тензорезисторів не залежать від потужності, що

використовується в них, і повної площі, займаної чутливим елементом, тому коливається в незначних межах: $R_{пп}=27..29 \text{ кВт/м}^2$

Певне значення вимірювального струму через тензорезистор досліджене за допомогою співвідношення $P=I^2 R=P_{пп} S_0$. Для дротових тензорезисторів з базою 1, кількість провідників у решітці чутливого елементу N і діаметром дроту d

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} n l, \quad R = \frac{4 n l \rho}{\pi d^2} \quad (1.7)$$

Особливістю приклеюємих тензорезистивних перетворювачів обставина, що вони являють собою перетворювачі разової дії, тобто не можуть та бути переклеєні об'єкта на об'єкт. Тому функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки визначають функцію перетворення аналогічного, так званого градуйованого, перетворювача тої ж партії. Природно, такий спосіб оцінки характеристик робочих тензоперетворювачів можна застосовувати лише в тому випадку, коли властивості перетворювачів всієї партії зовсім ідентичні, а залишкові деформації, викликані затвердінням клею при приклеїці робочих і градуйованих перетворювачів, також однакові. Досвід показує, що похибка від неідентичності при ретельній приклеїці тензорезисторів і гарній якості клею звичайно не перевищує 1,5%. [3]

Слід зазначити, що для приклеювання тензорезисторів до досліджуваної деталі застосовуються спеціальні клеї, для роботи в нормальних температурних умовах - ацетатно-целулоїдні й бакеліто - фенольні (БФ) клеї, для роботи при високих температурах (до 600.. ...800° С) — кремнійорганічні цементи (наприклад, Б-56, ВН-12) і спеціальні цементи на основі рідкого скла або полісілоксанів. Тензочутливість готових тензоперетворювачів практично не піддається точному розрахунку, тому що вона може істотно відрізнятись від тензочутливостей вихідного матеріалу. Крім впливу технологічних

факторів на відтворюваність тензорезистивних властивостей матеріалу істотний вплив на значення коефіцієнта тензочутливості перетворювача дають зігнутості в місцях закруглення дроту, особливо в петльових перетворювачах, У цих місцях утворюються ділянки, що не сприймають деформацію в напрямку ост бази. вимірювальна база (у двошарових перетворювачах з1.[3]

Зменшення чутливості, викликане цим фактором, тим більше, чим меншою зменшеною базою чутливість може зменшитися на 20...30%). Істотний вплив на результуючу чутливість робить поперечний тензоефект, зумовлений наявністю ділянок дроту, перпендикулярних осі бази перетворювача і сприймаючі поперечну плівкові перетворювачі, у яких переріз провідного шару в місці згину може деформацію. Цього недоліку практично повністю позбавлені фольгові й бути значно збільшено. [3]

1.8 Розробка принципової схеми підключення тензорезисторів

Популярною вимірювальною схемою в тензометрії є мостова схема. Існує три види мостової схеми, які відрізняються лише кількістю плечей мостової схеми, які знаходяться поза приладу. Найпростішою і найбільш зручною схемою підключення тензорезисторів є мостова схема лише з одним активним плечем; решта трьох інших плеч виконані, як стабільні резистори, розміщені в проміжному перетворювачі або установці. Використання такої схеми стало зручним з появою і постійним покращенням самотермокомпенсуючих тензорезисторів. В теперішній час популярне використання, особливо при тензометруванні та постійних статичних і квазістатичних процесів, має напів мостова схема, де основний тензорезистор використовують як активний, другий, підключений в суміжне плече моста, - за для швидкої температуної компенсації; решта плечей виконані у вигляді стабільних резисторів, які розміщені в проміжному перетворювачі або установці. Використовують також схему повного моста, в котрій усі плечі знаходяться поза межами

прилада. Цю схему використовують в основному саме в тих випадках, коли не вистачає перехідних опорів з'єднувальних ліній, комутаційних або струмоанулюючих пристроїв.

При вирішенні певних завдань тензометрування необхідне не тільки схема температурної компенсації, але і насамперед автоматичне виключення (під час вимірювання) впливу різноманітних складових деформації, виділення з сигналу тензорезисторів інформації, що необхідна для експериментатора.

На рисунку 1.16 приведено створену схему включення тензорезисторів, використану в розробленому тензометричному перетворювачі з метою досягнення термокомпенсації

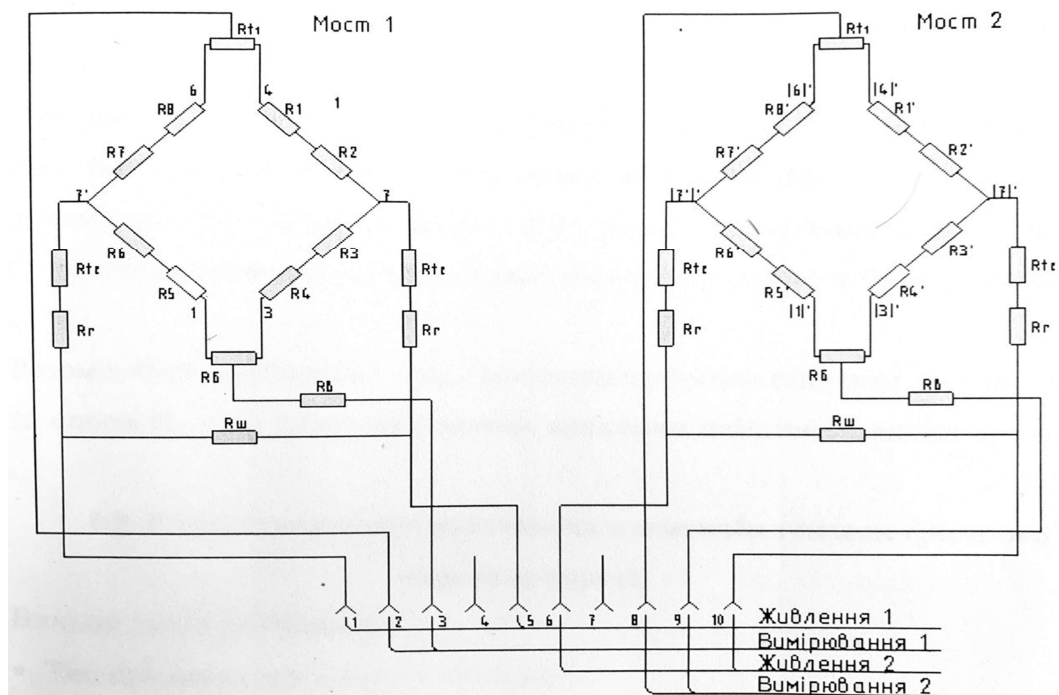


Рис 1.16 – Принципова схема тензометричного перетворювача

У представленому тензометричному перетворювачі використовується дві одна від одної незалежні, повні, мостові схеми з двома повністю активними і одним повністю компенсаційним резистором в сусідніх плечах. Плюси такої схеми полягають в тому, що за її допомогою заміряють лише зміну опору тензорезисторів 1-8, а не загальний їхній опір. Одною з переваг такої мостової схеми є варіанти

тарування моста, завдяки лінійному включенню двох тензорезисторів і одного допоміжного регулюючого резистора R_6 в решти два суміжних плеча.

Для плавної компенсації температурної зміни тензочутливості тензорезисторів, що призводить до редагування чутливості датчика сили, в ланцюг діагоналі живлення моста один за одним включають термочутливі опори R_{t2} , включаючи резистор R_t .

Установка термочутливих резисторів R_{t1} і R_{t2} дає можливість знизити температурну похибку до 0,1-0,5% на 10°C для фольгових тензорезисторних датчиків сили.

Підключення тензорезисторів в усі плечі моста зменшує похибку приблизно в 30 разів, тобто до 0.3% на 10°C . А підключенням в ланцюг моста термоопорів зменшує температурну похибку ще в 10-20 разів. Виходячи з цього, температурна похибка датчика сили з фольговими тензорезисторами знаходиться в межах 0,01 – 0,05%.

Разом із балансуєчими і термокомпенсаційними опорами в схему моста також входять R_1 і R_2 для регулювання певних величин вхідного і вихідного опорів моста.

1.9 Розрахунок певних елементів тензометричного перетворювача

Вихідні данні:

- Тип пружного елементу – осьовий;
- Діапазон вимірювальних навантажень – 80т

1.10 Підбір тензорезисторів для тензометричного перетворювача

Для розроблювання перетворювача я обрав фольгові тензорезистори, оскільки вони в порівнянні з дротяними мають, як правило, кращі, техніко-метрологічні характеристики, допускають утворення решітки практично будь-якої форми і розмірів. Основою

тензорезистора с плівка із синтетичної смоли або папір, просочений клеєм. Товщина плівкової основи тензорезистора становить 30-40 мкм, паперового 80- 100мкм. Елементи решітки фольгових тензорезисторів мають прямокутний перетин з більш вигідним відношенням периметра до площі поперечного перерізу, ніж в тензорезисторами з круглим перетином елементів решітки. Завдяки цьому розсіювання тепла фольговим тензорезисторів відбувається набагато краще, а допустимий робочий струм і вихідний сигнал можуть бути значно більше, ніж у дротяного тензорезистора при тих же розмірах. Фольгові тензорезистори мають у порівнянні з дротяними істотно меншу чутливість в поперечному напрямку. Це досягається збільшенням ширини поперечних ділянок решітки тензорезистора. Технологія фольгових виготовлення тензорезисторів заснована на використанні фотохімічних процесів і забезпечує отримання решіток будь-якої форми з базами від 0,3 мм і більше.[3]

Фольгові тензорезистори основних типорозмірів решітку мають константанової фольги по ТУ РМО-03 № 97-67.

Фольгові тензорезистори випускають декількох основних типів:

- Одноелементні тензорезистори 2ФСПА, 2ФСХЩ, 1ФКСК, 2ФСТК, 3ФКСК, ФК-СА, ФК-СБ, ФС-ПВ, складаються з однієї прямокутної решітки;
- Двоелементний розетки 2ФСРВ, ФК-РА, що складаються з двох схожих решіток, розташованих під прямим кутом;
- Трьох елементні тензорезистори, що складаються з трьох однакових решіток, розташованих під кутами 47° і 67° .

Для досліджуваного перетворювача я обрала фольговий тензорезистор типу 3ФКТК, що має наступні характеристики:

- 1) Номінальний опір датчки : $R=410 \text{ Ом}$;
- 2) Номінальний струм: 1330 мА;

- 3) Робочий діапазон температур: $T=265..475\text{ K}; B$
- 4) Довжина основи: $L=19\text{ мм};$
- 5) Ширина основи: $b=313\text{ мм};$
- 6) Довжина чутливого елементу: $s=140\text{ мм};$
- 7) База: $l=10\text{ мм};$
- 8) Матеріал підкладки- папір;
- 9) Тип спец. клею-БФ-2;
- 10) Діапазон вимірюваних деформацій: $\pm 4000-11000\text{ ЕОД}.$

1.11 Розрахунок статичної характеристики тензометричного перетворювача

Статичною характеристикою перетворювача називають функціональну залежність вихідного сигналу від сигналу на вході, при сталому значенні вихідного сигналу.

Це рівняння характеризує стан рівноваги чутливого елементу дає можливість проаналізувати статичну точність системи в урівноваженому стані. В залежності від властивостей статичних характеристик розрізняють такі групи: лінійні, нелінійні.

Для тензометричного перетворювача вхідною величиною є навантаження F , а вихідною-вихідна напруга $U_{\text{вих}}$.

Функція вимірювального ланцюга тензометричного перетворювача має наступний вигляд:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} * \frac{K * K_T}{(K+1)^2} * 2(1 + \mu) * \frac{F}{E * S_{\text{пер}}} \quad (1.10)$$

де K - коефіцієнт симетрії мостової схеми;

K_T - коефіцієнт чутливості тензодатчика;

E - модуль пружності матеріалу;

$S_{\text{пер}}$ — площа поперечного перерізу датчика;

μ - коефіцієнт Пуассона дорівнює 0,3.

Зважаючи на те, характеристика тензOMETричного статична перетворювача має лінійний характер, її можна записати наступним чином:

$$\text{РКП} = f(F). \quad (1.11)$$

Статична характеристика перетворювача наведена на рисунку 1.17.

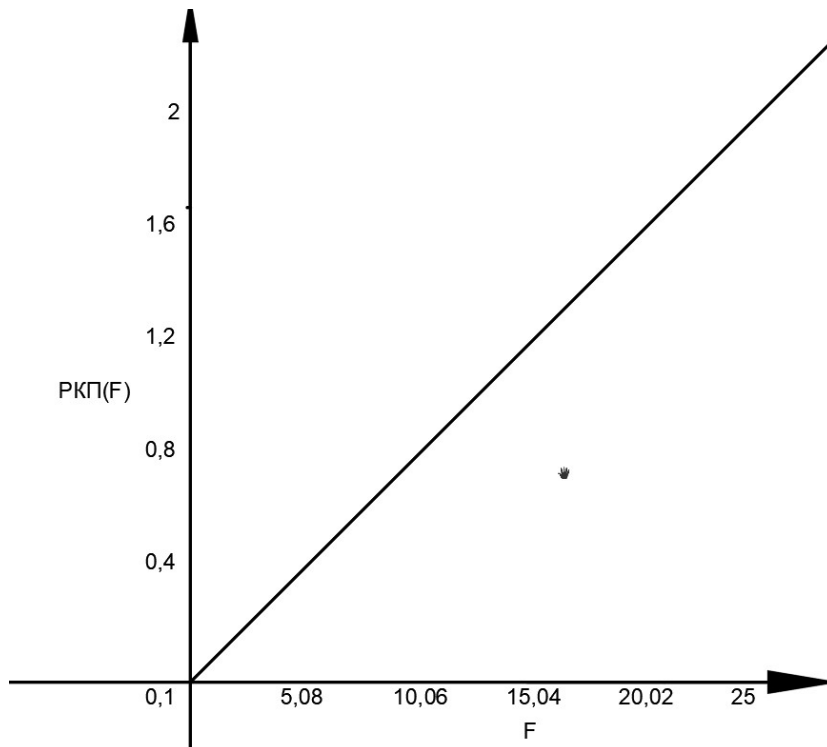


Рис 1.17 – Статична характеристика перетворювача

1.12 Розрахунок динамічної характеристики тензOMETричного перетворювача

Запишемо рівняння динаміки в наступному вигляді:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(t), \quad (1.12)$$

Де x - переміщення чутливого елемента;

m - маса чутливого елемента;

b - коефіцієнт демпфірування коливань;

c - жорсткість чутливого елемента;

F- навантаження; $m\ddot{x}$ -сила інерсії;
 $b\dot{x}$ -сила демпфірування;
 $c x$ - сила пружності.

Перепишемо рівняння в операторному вигляді:

$$m p^2 x(p) + b p x(p) + c x(p) = F(p). \quad (1.13)$$

Звідки визначасмо передаточну функцію перетворювача по формулі:

$$W(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{m p^2 + b p + c}. \quad (1.14)$$

При $p = j\omega$ передаточну функцію можна записати у вигляді:

$$W(j\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + j b \omega + c}. \quad (1.15)$$

де ω -частота вимушених коливань.

Тоді модуль передаточної функції має вигляд:

$$|W(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + b^2 \omega^2}}. \quad (1.16)$$

Визначимо амплітудно-частотну характеристику по формулі:

$$A(\omega) = \frac{|W(\omega)|}{|W(0)|} = \frac{1}{\frac{1}{c} \sqrt{(c - m\omega^2)^2 + b^2 \omega^2}}. \quad (1.17)$$

Після деяких перетворень маємо:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{m\omega^2}{c})^2 + \frac{b^2 \omega^2}{c^2}}}. \quad (1.18)$$

Враховуючи, що:

$$\begin{aligned} \frac{c}{m} &= \omega_0^2, \\ \frac{b}{m} &= 2\xi \omega_0, \end{aligned} \quad (1.19)$$

Де ω_0 — власна частота коливань чутливого елемента;

ξ - коефіцієнт згасання коливань, $\xi = 0,1$.

Запишемо деякі рівняння АЧХ в наступному вигляді:

$$\frac{b^2 \omega^2}{c^2} = \frac{4\xi^2 \omega_0^2 m^2 \omega^2}{c^2} = \frac{4\xi^2 \omega^2 \omega_0^2}{\omega_0^4} = \frac{4\xi^2 \omega^2}{\omega_0^2} = 4\xi^2 \gamma^2. \quad (1.21)$$

Де γ - відношення частот.

Формулапо визначенню АЧХ в спрощеному вигляді:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + 4\xi^2 \gamma^2}}. \quad (1.22)$$

Графік АЧХ зображений на рисунку 1.19.

Визначимо частоту власних коливань по наступній формулі[11]:

$$\omega_0 = \frac{0,249}{l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.23)$$

Де ρ -густина матеріалу чутливого елемента;

l - довжина чутливого елемента, м.

$$\omega_0 = \frac{0,249}{0,3} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{7850}} = 5366 \text{ Гц.}$$

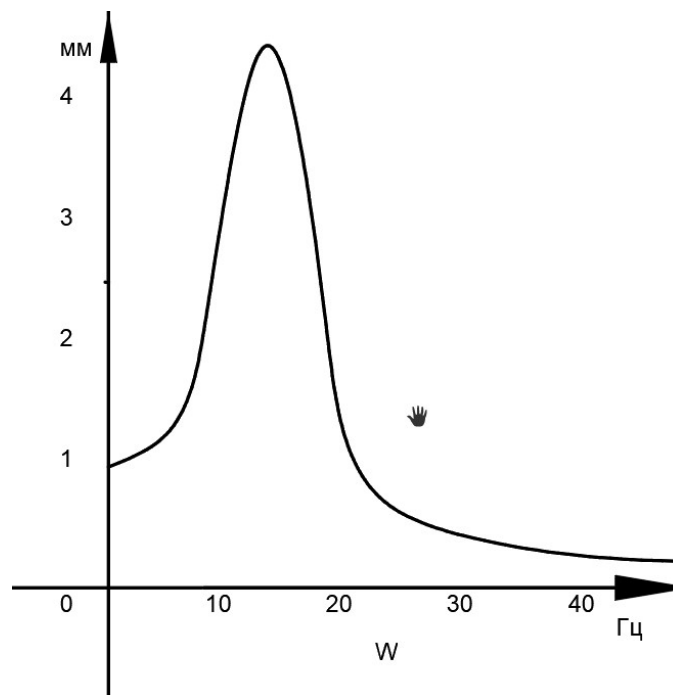


Рис. 1.18- Амплітудно-частотна характеристика перетворювача

Фазочастотна характеристика визначається по формулі.[12]:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{b\omega}{c - m\omega^2} = -\arctg \frac{2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (1.25)$$

Графік ФЧХ зображений на рисунку 1.19.

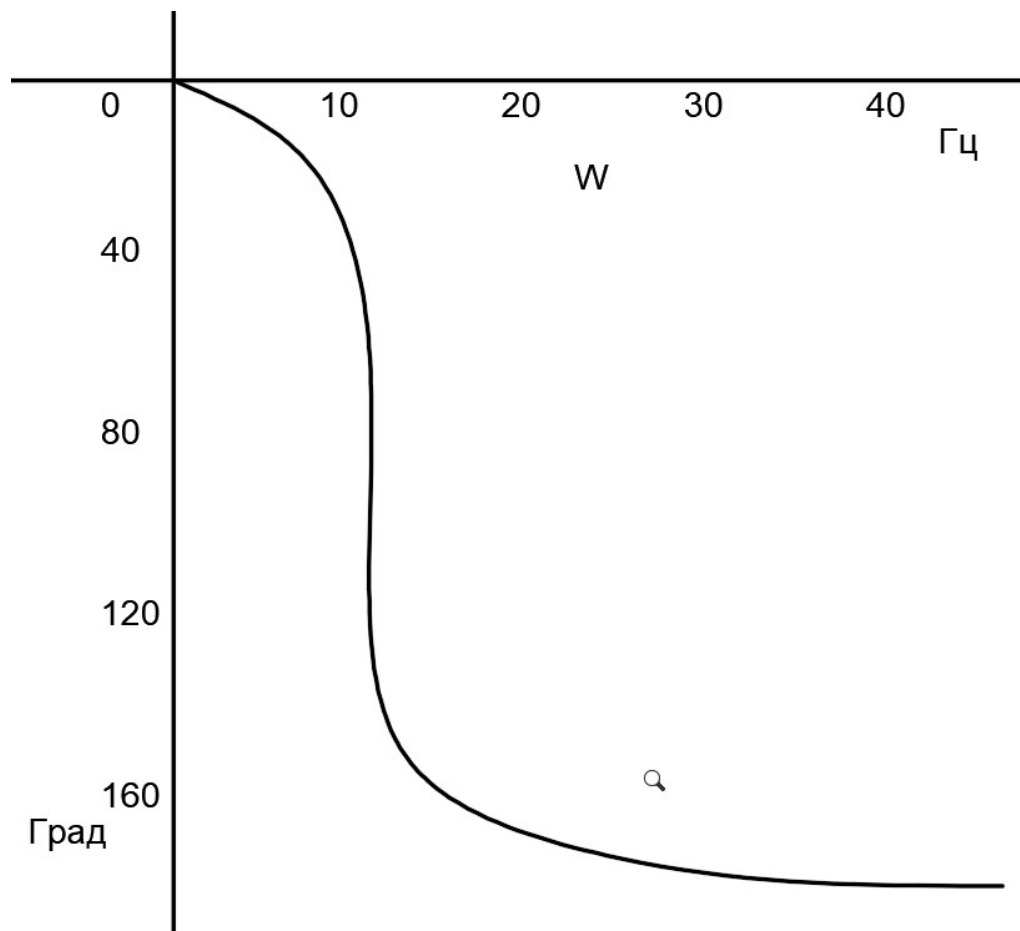


Рис.1.19- Фазочастотна характеристика перетворювача

Перехідна характеристика визначається по формулі [12]:

$$h(t) = 1 - e^{-2\pi\omega_0\xi t} \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos\left(2\pi\omega_0\sqrt{1-\xi^2}t + \arctg \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right). \quad (1.28)$$

Графік динамічної характеристики представлений на рисунку 1.20

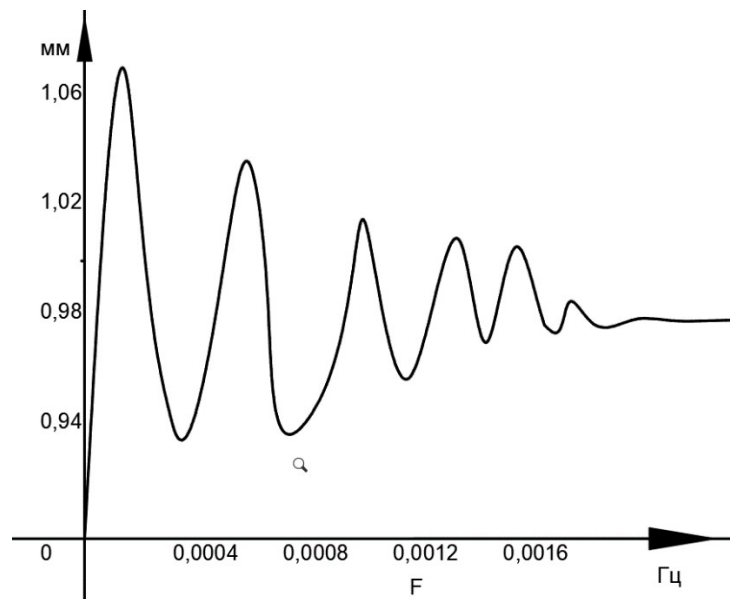


Рис. 1.20- Динамічна характеристика перетворювача

1.13. Розрахунок пружного елементу тензометричного перетворювача

Відштовхуючий вихідних даних до дипломного проекту зробимо прорахунок геометрії пружного елементу, вибравши матеріалом пружного елементу сталь 35ХГСА. Запишемо для визначення робочого коефіцієнту тензометричного перетворювача (РКП) [1]:

$$\text{РКП} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K \cdot K_T}{(K+1)^2} \cdot \frac{\frac{3}{2}Q}{E b h 2G}, \quad (1.27)$$

де К- коефіцієнт симетрії мостової схеми;

К_Т- коефіцієнт тензочутливості датчика;

Е- модуль пружності першого роду матеріалу;

S_{пер} – площа поперечного перерізу;

μ- коефіцієнт Пуассона, для матеріалу дорівнює 0,3.

Площа поперечного перерізу пустого циліндру може бути знайдена по формулі:

$$S_{\text{пер}} = \frac{\pi(d^2 - d_1^2)}{4}, \quad (1.28)$$

d- зовнішній діаметр сталльної труби;

d1-внутрішній діаметр сталюї труби.

Перетворивши рiвняння (1.27) S_{pi} пiдставивши в рiвняння (1.28) отримуємо:

$$PKP = \frac{K}{(K+1)^2} \cdot 4K_T \frac{3}{2} \frac{1}{bh} \frac{F}{4G}; \quad (1.29)$$

З рiвняння (1.29) знаходимо b :

$$b = \frac{k}{(k+1)^2} 4K_T \frac{3}{2} \frac{1}{PKP} \frac{F}{4G}; \quad (1.30)$$

Оскiльки,

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.31)$$

Далi пiдставляємо у (1.30) формулу (1.31), отримаємо наступне:

$$b = \frac{k}{(k+1)^2} 4K_T \frac{3}{2} \frac{1}{h PKP} \frac{F \cdot 2 \cdot (1+\mu)}{4E}; \quad (1.30)$$

У вiдповiдностi до завдання обираємо такi значення параметрiв:
 $K=1$; $K=2,1$; $\mu = 0,3\%$; $F=20$ МН; $E=210$ ГПа; $PKP=2,0$ мВ/В, $h=0,15$ м

Пiдставляємо цi значення у рiвняння (1.5):

$$b \approx \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{1 \cdot 2,1}{(1+1)^2} \cdot 2(1+0,3) \cdot \frac{25 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \right) + 0,15^2} \approx 0,25 \text{ см.}$$

Враховуючи те що вiдносна деформацiя повинна бути приблизно рiвною 0,1%, я обрала зовнiшнiй дiаметр рiвний 0,4 м. Тодi:

$$S_{пер} = \frac{\pi(0,4^2 - 0,15^2)}{4} = 0,108 \text{ м}^2,$$
$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E \cdot S_{пер}} = \frac{25 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9 \cdot 0,108} = 1,1 \cdot 10^{-3}.$$

Провiвши розрахунок основних геометричних параметрiв чутливого елементу. Будемо розраховувати, що вигини всiх балок чутливих елементiв однаковi.

D-64 мм;

D-52 мм;

L3266 мм;

P-5000 кг;

E=2x10⁹Па.

Тоді:

Розрахуємо статичний момент:

$$S_{max} = \frac{2D}{3\pi} \frac{\pi D^2}{8} - \frac{2d}{3\pi} \frac{\pi d^2}{8} = \frac{D^3 - d^3}{12} = \frac{(64\text{мм})^3 - (52\text{мм})^3}{12} = 10128 \text{ мм}^3 \quad (1.26)$$

Розрахуємо поперечну силу:

$$Q = \frac{P}{2} = \frac{5000\text{кг}}{2} = 2500\text{кг} \quad (1.27)$$

Розрахуємо ширину поперечного перерізу:

$$b = D - d = 12\text{мм} \quad (1.28)$$

Розрахуємо момент інерції поперечного перерізу:

$$J_y = \frac{\pi D^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{3,14((64\text{мм})^4 - (52\text{мм})^4)}{64} = 709305,66 \text{ мм}^4 \quad (1.29)$$

Розрахуємо дотичне напруження за формулою Журавського [7]:

$$\tau = \frac{QS_{max}}{J_y b} = \frac{2500\text{кг} \times 10128\text{мм}^3}{709305,66\text{мм}^4} = 35,69\text{Па} \quad (1.30)$$

Розрахуємо модуль пружності при крученні:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{210 \times 10^9 \text{Па}}{2(1+0,28)} = 82,03 \times 10^9 \text{Па} \quad (1.31)$$

Розрахуємо деформацію ЧЕ:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{35,9\text{Па}}{82,03 \times 10^9 \text{Па}} = 0,435 \times 10^{-9} \quad (1.32)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\gamma}{2} = \pm \frac{0,435 \times 10^{-9}}{2} = \pm 27 \times 10^{-6} \quad (1.33)$$

1.14. Розрахунок метрологічних характеристик тензометричного перетворювача

Важливою характеристикою будь-якого приладу є точність. Характеристикою точності є основна похибка - найбільш ймовірна похибка датчика в заданих експлуатаційних умовах. Основна похибка визначається як геометрична сума складових:

$$\delta = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_{\Gamma}^2 + \gamma_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{к}}^2 + \beta_{\text{к}}^2}. \quad (1.34)$$

де λ - стабільність показань;

γ_{Γ} - гістерезис;

$\gamma_{\text{н}}$ - нелінійність;

$\beta_{\text{к}}$ - зміна НКП при зміні температури на 10°C;

$\alpha_{\text{к}}$, - зміна РКП при зміні температури на 10°C;

Наразі не існує точних математичних методів дослідження похибок, тому значення обираємо з переглянутих аналогів:

λ_1	0,1	0,1	0,1
γ_{Γ}	0,5	0,02	0,02
$\gamma_{\text{н}}$	0,5	0,03	0,02
$\beta_{\text{к}}$	0,02	0,01	0,02
$\alpha_{\text{к}}$	0,05	0,01	0,02

При геометричному підсумуванні цих складових одержуємо значення основної похибки датчика:

$$\delta 1 = \sqrt{0,1^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,02^2 + 0,05^2} = 0,2\%; \quad (1.35)$$

$$\delta 2 = \sqrt{0,1^2 + 0,02^2 + 0,03^2 + 0,01^2 + 0,01^2} = 0,107\%; \quad (1.36)$$

$$\delta 3 = \sqrt{0,1^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,02^2} = 0,105\% \quad (1.37)$$

Таким чином розрахована основна похибка не перевищує похибку вказану в завданні на дипломний проект.

1.15. Моделювання ріп-датчика в програмному пакеті Solid Works

В програмному пакеті SolidWorks було створено 3D модель ріп-датчика. Задано матеріал ЧЕ- нержавіюча сталь, зафіксовано та надано навантаження.

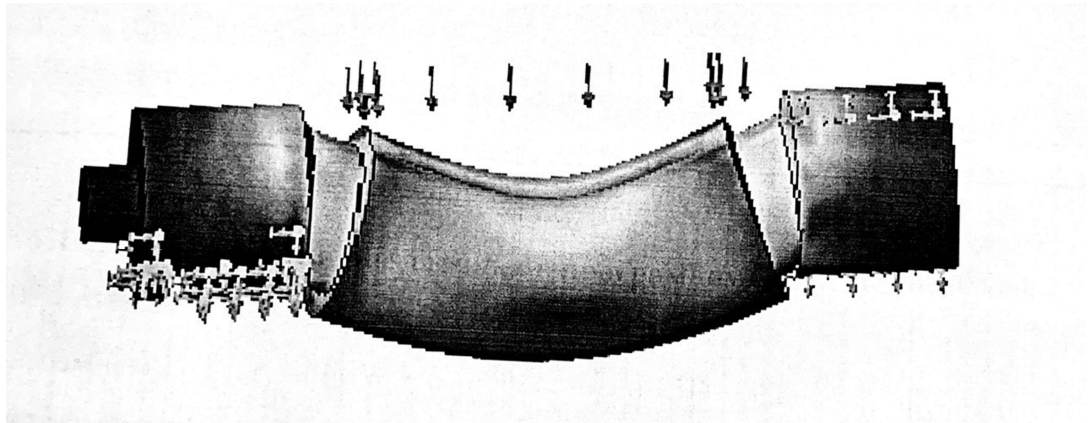


Рис 1.25 3D модель ріп-датчика

Висновки

При виконанні даної дипломної роботи був розроблений ріп-датчик, який може бути використаний на МБЛЗ, для вимірювання зусиль у який дорівнює 20т. А також були отримані наступні результати.

1. Розроблена принципова схема з'єднання тензорезисторів, дає змогу значно понизити вплив нелінійності і температурну похибку до 0,05%;

2. Підібрані фольгові тензорезистори типу ЗФКТК мають малі габаритні розміри і великий номінальний опір, а також можуть працювати при високих температурах;

3. Був розроблений пружний елемент який лінійно деформується при навантаженні до 20кН і при цьому деформація дорівнює 0,1%;

4. Розраховані метрологічні характеристики забезпечують високий рівень вихідної напруг, РКП- 2,0мВ/В.

5. Подальше вдосконалення ваговимірювального тензометричного перетворювача повинно бути направлено на збільшення точності вимірювання одиниці деформації і на можливість роботи даного перетворювача при дуже високих температурах, $T > 500^{\circ}\text{C}$.

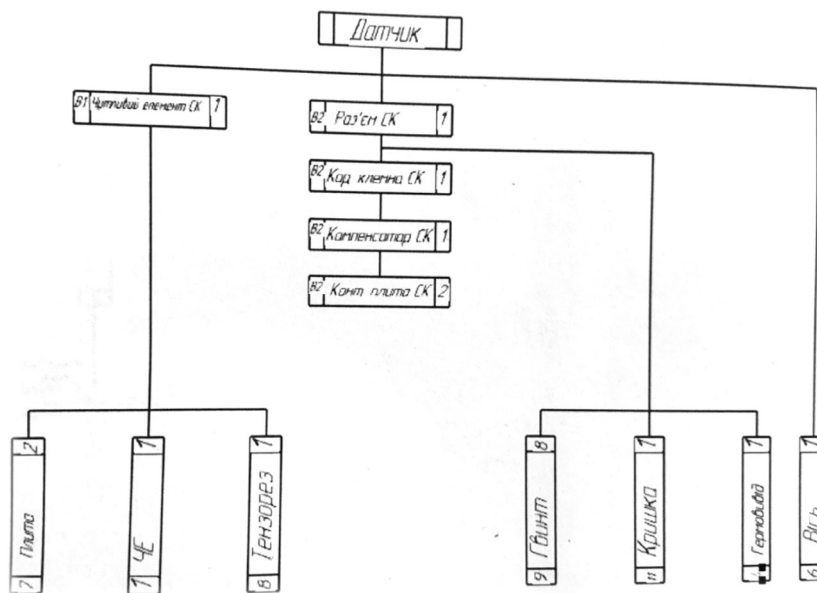
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

					ДПБ ПМ6101.000.000 ПЗ	Лист
						42
Зм...	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2.1 Схеми збіркового складання

Схеми збіркового складання (СЗС) ілюструє ієрархічну структуру виробу та служить для розуміння процесу складання. Знаходить своє використання при оцінюванні складності виробу, а також при технологічній підготовці виробництва. Так розрахунок коефіцієнтів технологічності процесу складання частково базується на описуваній схемі.

На рис. 2.1 представлена схема ступенів складання для розроблюваного датчика.



2.2 Технологічна схема складання

Технологічна схема складання (ТСС) показує технологічну послідовність складання виробу. Вона є вдосконаленим та ускладненим видом СЗС.

Основними елементами ТСС є:

Базовий елемент складання – це деталь, або складальна одиниця що зазвичай має складну форму та до якої приєднується всі інші деталі та складальні одиниці. Складання проводиться зліва на право від базового елемента.

Базова лінія складання – це лінія відносно якої зображується процес складання, в її кінці знаходиться готовий виріб.

На рис 2.2 представлена технологічна схема для нашого датчика.

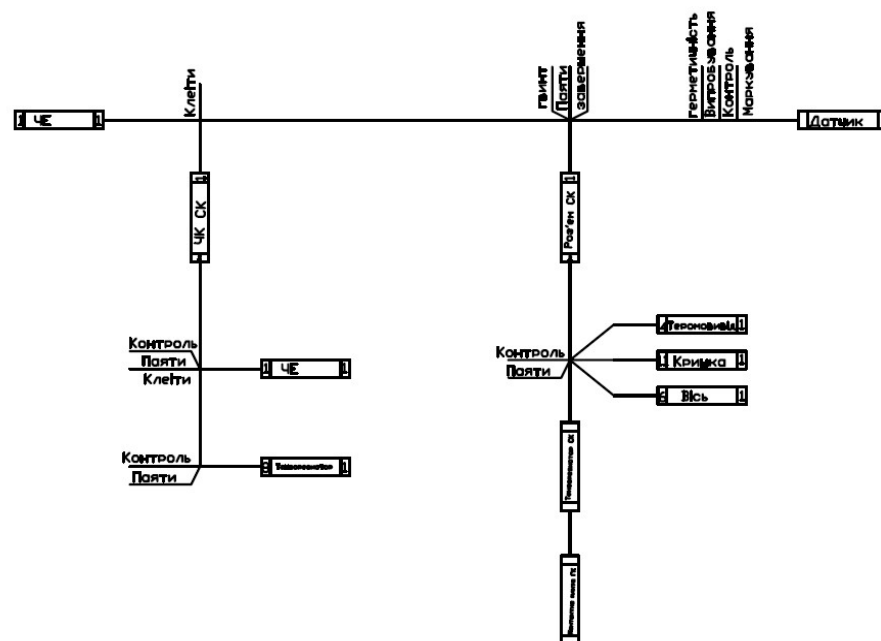


Рис. 2.2. Технологічна схема складання

2.3.1 Розрахунок прямої задачі

Методом часткового диференціювання. Коли задана точність первісних характеристик, та по ним визначається точність вихідного фізичного параметру.

Так як передаточні функції між фізичним параметром та вхідними характеристиками зазвичай у техніці задаються дробовими

функціональними ступеневими залежностями типу $Q_0 = b^x c^y / d^z e^v$, то первісні характеристики поділяються на збільшуючі та зменшуючі.

Збільшуючі- це ті, які стоять у чисельнику та при збільшенні збільшують Q_0 та мають і $(+a_i)$, а зменшуючі- ті, що стоять у знаменнику та мають $(-a_i)$. Точність на виробництві задається допусками $\Delta q_i \rightarrow \delta_i$, та вони мають свої відхилення: $(BO) \rightarrow (+)$ або $(HO) \rightarrow (-)$. На виробництві звичайно мають справу з допусками. Тоді згідно (2.6) допуск вихідного параметра:

$$\delta_Q = \sum_{i=1}^n (a_i \delta_i). \quad (2.6)$$

Задані δ_i своїми $(BO)_i$ та $(HO)_i$.

Необхідно знайти δ_Q та його $(BO)_Q$ і $(HO)_Q$ - урахуванням $(+a_i)$, $(+a_i)$ та $(BO)_i$ і $(HO)_i$, отримуємо:

$$\begin{aligned} (BO)_Q &= \sum_{i=1}^m \left(+a_i \right) (BO)_i + \sum_{j=1}^p \left(-a_j \right) (HO)_j, \\ (HO)_Q &= \sum_{i=1}^m \left(+a_i \right) (HO)_i + \sum_{j=1}^p \left(-a_j \right) (BO)_j. \end{aligned} \quad (2.7)$$

В якості параметра, точність якого контролюється, обрано деформацію пружного елемента.

Розрахунок деформації пружного елемента виконується за формулою:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{l}{b h^2} \frac{F}{E} \quad (2.8)$$

Вихідними параметрами для розрахунку є:

$$L=45 \text{ мм}; \delta l= 0.011;$$

$$B=25 \text{ мм}; \delta b= 0.013;$$

$$h=2 \text{ мм}; \delta h= 6 * 10^{-3};$$

$$F=200 \text{ Н}; \delta F=0.1 \text{ Н};$$

$$E=70 \text{ ГПа}; \delta E=2 \text{ ГПа};$$

Максимальна похибка обчислюється за формулою:

$$\partial \varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial l} \delta l + \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} \delta b + \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \delta h + \frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \delta F + \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \delta E \quad (2.9)$$

Обчислимо:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial l} = \frac{3}{2} \frac{1}{b} \frac{F}{h^2 E} = \frac{3}{2} \frac{1}{25 \cdot 2^2} \frac{200}{70} = 0.042$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -\frac{3}{2} \frac{l}{b^2} \frac{F}{h^2 E} = -\frac{3}{2} \frac{45}{25^2 \cdot 2^2} \frac{200}{70} = -0.077$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} = -3 \frac{l}{b} \frac{F}{h^3 E} = 3 \frac{45}{25 \cdot 2^3} \frac{200}{70} = -1.928$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} = \frac{3}{2} \frac{l}{b} \frac{1}{h^2 E} = \frac{3}{2} \frac{45}{25 \cdot 2^2} \frac{1}{70} = 0.0096$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial E} = -\frac{3}{2} \frac{l}{b} \frac{F}{h^2 E^2} = -\frac{3}{2} \frac{45}{25 \cdot 2^2} \frac{200}{70^2} = -0.027$$

Підставивши в формули (2.7-2.9) вище вказані значення отримаємо:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{3}{2} \frac{l}{b} \frac{F}{h^2 E} = \frac{3}{2} \frac{45}{25 \cdot 2^2} \frac{200}{70} = 1,929 \\ \partial \varepsilon &= 0.042 \cdot 0.011 + (-0.077) \cdot 0.013 + (-1.928) \cdot 6 \cdot 10^{-3} + 0.0096 \cdot 0.1 + \\ &\quad (-0.027) \cdot 2 = -0.066 \\ BB_{\varepsilon} &= \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial l} \cdot BB_l + \frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot BB_F \right] + \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} \cdot HB_b + \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot HB_h + \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \cdot HB_E \right] = [0.042 \cdot (0) + \\ &\quad 0.0096 \cdot (0.05)] + [(-0.077) \cdot 0 + (-1.928) \cdot (0) + (-0.027) \cdot (-1)] = 0.028 \\ HB_{\varepsilon} &= \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial l} \cdot HB_l + \frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot HB_F \right] + \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} \cdot BB_b + \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot BB_h + \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \cdot BB_E \right] = [0.042 \cdot \\ &\quad (-0,011) + 0.0096 \cdot (-0,05)] + [(-0.077) \cdot 0,013 + (-1.928) \cdot 0.006 + \\ &\quad (-0.027) \cdot 1] = -0.041 \end{aligned}$$

В наслідок розрахунків було отримано:

максимальна похибка деформації $\delta \varepsilon = -0.066$;

Верхня межа відхилення від номіналу $BB_{\varepsilon} = +0.028$;

Нижня межа відхилення $HB_{\varepsilon} = -0.041$;

Відповідь $\varepsilon = 1,92_{-0.041}^{+0.028}$

2.3.2. Розрахунок Оберненої задачі

Методом часткового диференціювання. При розробці нового приладу конструктору часто необхідно мати визначену задану величину вихідного фізичного параметру Q_0 точність якого він задає необхідними відхиленнями (ВО) Q і Q (НО). Вирішити цю задачу по забезпеченню заданої точності вихідного параметру можливо простим та економічним способом за рахунок, призначення компенсуючого параметру з загального виразу функції.

Компенсуючий параметр обирається зі всієї множини визначаючих характеристик q_i , як найбільш технологічний і простий у виконанні на виробництві, і призначається компенсатором- q_k а на всі інші q_i , з поданої передаточної функції виконуються за економічно вигідними допусками δ_i .

Задача зводиться до визначеного необхідного допуску на заданий компенсатор, щоб задовольнити заданим умовам.

Збільшуючі ланки: 1, F;

Зменшуючі ланки: b, h, E;

В якості компенсуючої ланки обрано ширину датчика b. Змінюючи ширину можна компенсувати похибку деформації, що виникла в наслідок недотримання точності розмірів h та l а також при відхиленні значення модуля пружності матеріалу датчика.

$$\begin{cases} BB_k = -\frac{1}{a_k} [HB_Q - (\sum_{i=1}^m (+a_i) \cdot (HB_i) + \sum_{j=1}^{p-1} (-a_j) \cdot (BB_j))] \\ HB_k = -\frac{1}{a_k} [BB_Q - (\sum_{i=1}^m (+a_i) \cdot (BB_i) + \sum_{j=1}^{p-1} (-a_j) \cdot (HB_j))] \end{cases}$$

$$a_k = a_b$$

(2.10)

$$a_b = \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -\frac{3}{2} \frac{l}{b^2} \frac{F}{h^2 E} = -\frac{3}{2} \frac{45}{25^2 \cdot 2^2} \frac{200}{70} = -0.077$$

$$a_h = \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} = -3 \frac{l}{b} \frac{F}{h^3 E} = 3 \frac{45}{25 \cdot 2^3} \frac{200}{70} = -1.928$$

$$a_l = \frac{\partial \varepsilon}{\partial l} = \frac{3}{2} \frac{1}{b} \frac{F}{h^2 E} = \frac{3}{2} \frac{1}{25 \cdot 2^2} \frac{200}{70} = 0.042$$

$$a_F = \frac{\partial \varepsilon}{\partial F} = \frac{3}{2} \frac{l}{b} \frac{1}{h^2 E} = \frac{3}{2} \frac{45}{25 \cdot 2^2} \frac{1}{70} = 0.0096$$

$$a_E = \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} = -\frac{3}{2} \frac{l}{b} \frac{F}{h^2 E^2} = -\frac{3}{2} \frac{45}{25 \cdot 2^2} \frac{200}{70^2} = -0.027$$

Підставивши розрахункові значення у формулу (3.10) отримаємо:

$$BB_k = -\frac{1}{a_b} (HB_\varepsilon - (a_l \cdot HB_l + a_F \cdot HB_F) + (a_h \cdot BB_h + a_E \cdot BB_E))) =$$

$$\left(-\frac{1}{-0.077} \left[(-0.041) - \left((0.042 \cdot (-0.011) + 0.0096 \cdot (-0.05)) + (1.928 \cdot 0.006 + (-0.027) \cdot 1) \right) \right] \right) = 1.24$$

$$HB_k = -\frac{1}{a_b} (BB_\varepsilon - (a_l \cdot BB_l + a_F \cdot BB_F) + (a_h \cdot HB_h + a_E \cdot BB_E))) =$$

$$-\frac{1}{-0.077} \left[0.028 - \left((0.042 \cdot 0 + 0.964 \cdot 0.05) + (1.928 \cdot 0 + (-0.027) \cdot (-1)) \right) \right] =$$

$$-0.74$$

Отримуємо: $b = 25_{-0.714}^{+1.04}$, це значить, що похибка розмірів h та l при виготовленні, а також відхилення модуля пружності від номінального значення, можна компенсувати зміною розміра b у вказаних інтервалах

2.4 Проектування технологічного процесу

Одним з основних етапом проектування технологічного процесу є розробка маршруту складання, що є переліком операцій в порядку їх виконання. При встановленні послідовності операцій необхідно керуватися наступними загальними принципами:

- попередні операції не повинні затрудняти виконання подальших операцій і в наступних операціях точність складання повинна зростати;
- при точному складанні розбиття процесу на операцій диктується режимом складання, причому час, що витрачається на виконання кожної операції, повинен бути однаковим або кратним;
- операцій, на яких можливий брак, виконується спочатку та після них виконується операція контролю.

Маршрут складання зазвичай розпочинається з підготовчої операції, в процесі якої здійснюється отримання, розконсервація, розмагнічування сталевих, промивка, очищення і контроль основних деталей тощо.

Надалі маршрут будується з урахуванням розбиття приладу на складальні одиниці. Маршрутний технологічний процес оформляється в маршрутній карти згідно ГОСТ 3.1118.82. Маршрут карти з детальним описом операції приведення в додатку.

В маршрутному процесі виділити такі операції:

005 Комплектовочна
010 Розпакувальна
015 Складальна
020 Складальна
030 Складальна
035 Герметизація
040 Контроль
045 Випробування
050 Маркування

2.5 Визначення технологічності

Технологічність конструкції називається така властивість окремих деталей, складальних одиниць і приладів у цілому, при якій для даних умов, даного масштабу випуску і даних технічних вимог до приладу забезпечується найбільше швидке і економічне освоєння його виробництва, а також найбільше раціональне його виготовлення.

Конструкція технологічна, якщо вона має найменшу трудомісткість, найбільшу уніфікацію і нормалізацію складальних одиниць і деталей, широкі можливості застосування найбільш простих і раціональних операцій, а також можливість автоматизації устаткування.

Для усіх виробів при відпрацюванні конструкції на технологічність ставляться такі задачі:

- зниження трудомісткості виготовлення;
- застосування стандартних складових частин;
- використання уніфікованих складових частин;
- використання уніфікованих деталей;
- можливість застосування типових технологічних процесів;

Для складальних одиниць задачами відпрацювання на технологічність є забезпечення технологічності принциповою і конструктивною схемами складальної одиниці, забезпечення технологічне компонування складальної одиниці, забезпечення правильних і раціональних настановних баз, забезпечення раціонального членування на складові частини, забезпечення умов регулювання, контролю й іспитів, скорочення номенклатури застосованих матеріалів.

Для зручності та наочності при розрахунках, створено таблиці з переліком необхідних для подальших розрахунків відомостей, а саме перелік та кількість уніфікованих та не уніфікованих деталей, складальних одиниць, або вузлів, та перелік операцій використовуваних в процесі складання.

Технологічними є вироби, які забезпечують паралельність складання, можливість диференціації складання, найбільшу уніфікацію та нормалізацію деталей, можливість використання автоматизації процесів складання при найменшій кількості матеріалів та обладнання.

Таблиця 2.1 не уніфікованих деталей приладу

№	Назва	Кількість
1	Пружний елемент	1
2	Контактна плита	1
3	Компенсатор	1
4	Роз'єм	1

Таблиця 2.2. Уніфікованих деталей приладу

№	Назва	Кількість
1	Вісь	5
2	Гвинт	8
3	Тензорезистор	2
4	Гермовивід	1
5	Плата	2

Таблиця 2.3. Перелік вузлів приладу

№	Назва	Кількість
1	Чутливий елемент СК	1
2	Роз'єм СК	1

Таблиця 2.4. Перелік операцій

№	Назва	Тип операції
1	Склеювання	Уніфікована
2	Герметизація	Неуніфікована
3	Контроль	Не уніфікована
4	Випробування	Не уніфікована
5	Маркування	Не уніфікована

Відносні показники технологічності – комплекс показників, які торкаються конструктивних та технологічних аспектів нового виробу.

а) Показник складності виробу:

$K_{ск} < 0,1$ – низька технологічність виробу,

$K_{ск} = 0,1..0,2$ – задовільна технологічність виробу,

$K_{ск} > 0,2$ – хороша технологічність виробу.

$$K_{скл} = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\Sigma}} = \frac{2}{7} = 0,285 \quad (2.1)$$

Де N_{Σ} – загальна кількість вузлів, n_{Σ} – загальна кількість деталей у пристрої.

У нашому випадку технологічність виробу є хорошою.

б) Показник уніфікації виробу:

$K_y < 0,25$ – низька технологічність виробу,

$K_y = 0,25..0,5$ – задовільна технологічність виробу,

$K_y > 0,5$ – хороша технологічність виробу.

$$K_y = \frac{N_y + n_y}{N_{\Sigma} + n_{\Sigma}} = \frac{(1+4)}{(3+5)} = 0,625 \quad (2.2)$$

де $(N_y + n_y)$ – сума уніфікованих вузлів та деталей, $(N_{\Sigma} + n_{\Sigma})$ – загальна

сума вузлів та деталей пристрою.

У нашому випадку технологічність добра.

в) Показник уніфікації деталей:

$$K_{y.д.} = \frac{n_y}{n_{\Sigma}} = \frac{4}{5} = 0.8 \quad (2.3)$$

де n_y – загальна кількість уніфікованих деталей, n_{Σ} – загальна кількість деталей у пристрої.

У даному випадку технологічність добра.

г) Показник уніфікації ТП:

$$K_{y.о.} = \frac{Q_y}{Q_{\Sigma}} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (2.4)$$

Де Q_y – кількість уніфікованих операцій, Q_{Σ} – загальна кількість операцій.

В даному випадку технологічність задовільна.

е) Комплексний показник технологічності:

Вважаємо $\sum_{i=0}^n q_i = 1$, тоді

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i K_i}{n} = \frac{0.285 \cdot 0.15 + 0.625 \cdot 0.35 + 0.8 \cdot 0.35 + 0.2 \cdot 0.15}{1} = 0.571 \quad (2.5)$$

Беручи до уваги вище перераховане робимо висновок: Оскільки $0.3 < K_{\Sigma} < 0.6$, то комплексна технологічність виробу є задовільною. В залежності від рівня технологічності виготовлення вибираємо тип виробництва приладу. Для виробу, що має технологічність 0.571 найбільш оптимальним являється одиночне виробництва.

Висновок до технологічного розділу

Виконавши технологічний розділ було проведено оцінку рівня технологічності показник складності виробу, показник уніфікації саме: виробу, показник уніфікації ТП, показник уніфікації деталей і комплексний показник технологічності з якої визначили, що виріб є технологічним для одиночного виробництва. Також розраховано параметричну точність прямої і оберненої задачі методом часткового диференціювання. В процесі виконання технологічного розділу було складено технологічну схему складання і схему складального складу. Також складено маршрутні та операційні карти.

Список використаних джерел

1. Писаренко Г.С. та ін. Опір матеріалів: Підручника.-К.: Вища шк., 2004.
2. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники/Г. И. Изъюрова, Г. В. Королев, В. А. Терехов и др.-М.: Висшая шк., 1987.
3. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Проектирования датчиков для измерения механических величин/ Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроения, 1979. 480 с.
5. Методы и средства измерений: Учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Издательський центр «Академия», 2004. -336 с.
6. Абрамчук Г.А. Методы исследования динамических характеристик наклеиваемых тензорезисторов//Проблемы прочности. 1985.
7. Характеристики материалов для упругих элементов тензорезисторных измерительных устройств/ В.А. Борисов, А.П. Быкон, А.В. Игнатов и др.// Измерит. техника. 1985.
8. Тихонов А. И., Осадчий Е. П., Карпов В. И., Чернцов К. Н., Спиридонов В. М. «Проектирование технических средств автоматики и телемеханики. Датчики механических величин».
9. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология материалов, 2001, 640 с.
10. Електротехніка з основами промислової електроніки: Підруч. Для учнів проф.. –техн. навч. закладів/ А.М. Гурій, А.М. Сільвестров, Н.І. Поворознюк. – К.: Форум, 2002. – 382 с.
11. Ваганів В.И., Интегральные тензопреобразователи, М., Энергоатомиздат, 1983.